

卓越计划·工程力学丛书

材料力学基础

杨少红 胡明勇 主编



科学出版社

卓越计划·工程力学丛书

材料力学基础

杨少红 胡明勇 主 编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书根据高等学校理工科非力学专业材料力学课程教学基本要求编写而成。全书包括材料力学基本知识,轴向拉伸与压缩,剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,应力状态分析与强度理论,组合变形,压杆稳定,动载荷和能量法等12章。附录列出了静力学平衡问题,截面的几何性质,应变分析和电测法。书后还附有型钢表、主要符号及部分习题答案。教材内容丰富,与工程实际问题联系密切,适用范围广。

本书既可以作为高等学校理工科非力学专业材料力学教学用书,也可作为少学时的工程力学教学用书,还可以供高职高专与成人教育师生及有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学基础/杨少红,胡明勇主编. —北京:科学出版社,2017.6

(卓越计划·工程力学丛书)

ISBN 978-7-03-053898-7

I. ①材… II. ①杨… ②胡… III. ①材料力学—高等学校—教材
IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 143481 号

责任编辑:吉正霞/责任校对:肖 婷

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年6月第一版 印张:20

2017年6月第一次印刷 字数:474 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

卓越计划·工程力学丛书

《材料力学基础》编委会

主 编 杨少红 胡明勇

副主编 郑 波 吴 菁

编 委 (按姓氏笔画排序)

杨少红 吴 菁 吴蒙蒙

郑 波 胡明勇 黄 方

主 审 章向明 施华民

前 言

为了培养人才、服务教学、促进高等学校力学基础课程的改革与建设,增进青年学生学习力学的兴趣,培养分析、解决实际问题的能力,我们精心编写了这本《材料力学基础》教材。本书属于海军工程大学材料力学精品课程建设的研究成果,是根据高等学校理工科非力学专业材料力学课程教学基本要求编写而成。

本书包括材料力学基本知识、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析与强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷和能量法 12 章。附录列出了静力学平衡问题、截面的几何性质、电测法和应变分析。书后还附有型钢表、主要符号及部分习题答案。

在本书编写过程中,力图体现以下特色:

(1)教材内容丰富。教材融汇了作者多年的教学经验,叙述清晰,文字简练,并形成一个完整的教学体系。教材在内容安排上以概念为基础、以方法为手段、以工程应用为需求牵引,注重知识体系的创新与延展,既强调理论基础,又重视工程应用;在教学体系上体现了技术基础课内容的系统性、前沿性和宽口径、厚基础的教育思想。

(2)教学内容与工程实际问题密切联系。书中部分内容是从科研内容、工程实际中简化来的力学问题,有较强的研究和工程应用背景,有利于加强学生的工程概念和工程意识,培养学生解决工程实际问题的能力。每章都有思考与讨论,对于增强学生的思维能力非常重要,可在学习中形成良性互动。

(3)适用范围广。本书既可以作为高等学校理工科非力学专业材料力学教学用书,也可作为少学时的工程力学(静力学+材料力学)教学用书,还可以供高职高专与成人教育师生及有关技术人员参考。

本书第 1~4 章和附录由杨少红编写,第 5 和 6 章由吴菁编写,第 7 章由黄方编写,第 8、9 和 12 章由胡明勇编写,第 10 和 11 章由郑波编写。吴蒙蒙编写了部分习题,研究生刘海燕和魏昭祯画了部分图形。全书由杨少红负责统稿。

本书由章向明教授和施华民副教授主审。两位老师在力学教学方面经验丰富,提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,教材中难免存在一些不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 3 月

目 录

第 1 章 材料力学基本知识	1
1.1 材料力学的任务	1
1.1.1 材料力学的研究对象	1
1.1.2 材料力学的研究内容	3
1.2 材料力学的基本假设	4
1.2.1 连续性假设	5
1.2.2 均匀性假设	5
1.2.3 各向同性假设	5
1.3 外力和内力	6
1.3.1 外力	6
1.3.2 内力	6
1.3.3 截面法	8
1.4 应力和应变	9
1.4.1 应力	9
1.4.2 线应变	10
1.4.3 切应变	11
1.4.4 应力应变关系	12
1.5 思考与讨论	13
1.5.1 材料力学模型	13
1.5.2 材料力学分析方法	13
1.5.3 材料力学内力	14
1.5.4 旗杆的设计和强度分析	14
习题 1	15
第 2 章 轴向拉伸与压缩	16
2.1 轴向拉伸与压缩杆件及实例	16
2.2 拉压杆横截面上的内力和轴力图	18
2.2.1 拉压杆横截面上的内力	18
2.2.2 轴力图	18
2.3 拉压杆的应力	21

2.3.1	拉压杆横截面上的应力	21
2.3.2	拉压杆斜截面上的应力	23
2.3.3	杆端区域的应力分布	24
2.3.4	应力集中	25
2.4	材料在轴向拉伸和压缩时的力学性能	26
2.4.1	试件和设备	26
2.4.2	低碳钢拉伸时的力学性能	27
2.4.3	铸铁拉伸时的力学性能	30
2.4.4	其他塑性材料拉伸时的力学性能	31
2.4.5	低碳钢在压缩时的力学性能	31
2.4.6	铸铁在压缩时的力学性能	32
2.5	许用应力 安全系数 强度条件	32
2.5.1	许用应力与安全系数	32
2.5.2	强度条件	34
2.6	拉压杆的变形	36
2.6.1	沿杆件轴线的轴向变形	36
2.6.2	横向变形	37
2.6.3	变截面杆的伸长变形	37
2.7	拉压杆超静定问题	39
2.7.1	超静定的概念和解法	39
2.7.2	温度应力	42
2.8	思考与讨论	43
2.8.1	复合材料等截面直杆的轴向拉伸	43
2.8.2	拔河绳的拉伸强度	44
2.8.3	断缆事故的对策	44
2.8.4	塑性和脆性材料的力学性能比较	45
习题 2		45
第 3 章 剪切		51
3.1	剪切的工程和工程实例	51
3.2	剪切的实用计算	53
3.3	挤压的实用计算	54
3.4	思考与讨论	58
3.4.1	连接件的简化计算	58
3.4.2	综合处理工程构件的强度	59
习题 3		59

第 4 章 扭转	62
4.1 扭转的概念和工程实例	62
4.2 扭矩和扭矩图	63
4.2.1 外力偶矩	63
4.2.2 扭矩	64
4.2.3 扭矩图	65
4.3 圆轴扭转时的应力	67
4.3.1 变形几何关系	67
4.3.2 切应力互等定理和物理关系	68
4.3.3 静力学关系	69
4.3.4 横截面上的切应力表达式	70
4.4 圆轴扭转时的破坏和强度条件	71
4.4.1 扭转实验与扭转破坏现象	71
4.4.2 圆轴扭转时的强度条件	72
4.5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	74
4.5.1 圆轴扭转时的变形	74
4.5.2 圆轴扭转时的刚度条件	74
4.6 简单静不定轴	77
4.7 非圆截面轴扭转简介	79
4.7.1 矩形与椭圆等非圆实心截面轴扭转	80
4.7.2 薄壁杆扭转	81
4.8 思考与讨论	83
4.8.1 圆轴扭转的切应力和扭矩的关系	83
4.8.2 复合材料圆轴的扭转	83
4.8.3 闭口和开口薄壁圆管的强度比较	84
习题 4	84
第 5 章 弯曲内力	89
5.1 弯曲的概念和工程实例	89
5.1.1 梁的弯曲	89
5.1.2 平面弯曲	90
5.1.3 梁的计算简图	90
5.1.4 静定梁的基本形式	91
5.2 剪力和弯矩	91
5.2.1 剪力 F_s 和弯矩 M	91
5.2.2 剪力 F_s 和弯矩 M 的符号规定	92

5.2.3 剪力和弯矩的求法	93
5.3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	94
5.4 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	96
5.4.1 剪力、弯矩与分布载荷集度之间的微分关系	96
5.4.2 剪力、弯矩与分布载荷集度之间的积分关系	97
5.4.3 不同载荷作用下梁段的剪力图和弯矩图的形状	97
5.4.4 弯矩极值位置和弯矩极值大小	100
5.4.5 剪力图和弯矩图的画法	100
5.5 思考与讨论	103
习题 5	104
 第 6 章 弯曲应力	111
6.1 纯弯曲时的正应力	111
6.1.1 变形现象与平面假设	111
6.1.2 正应力分布规律	112
6.1.3 弯曲正应力	113
6.2 横力弯曲时的正应力及弯曲正应力强度条件	114
6.2.1 最大正应力	114
6.2.2 梁的正应力强度条件	115
6.3 梁的切应力及强度条件	119
6.3.1 矩形截面梁横截面上的切应力	119
6.3.2 工字型截面梁横截面上的切应力	121
6.3.3 圆形、圆环形截面梁横截面上的切应力	121
6.3.4 梁的切应力强度条件	122
6.4 提高梁强度的主要措施	123
6.4.1 合理布置梁上的载荷和合理安排梁的支承	123
6.4.2 选用合理的截面形状	125
6.4.3 合理利用材料的性能	126
6.4.4 采用变截面梁	126
6.5 思考与讨论	127
6.5.1 高架桥裂纹位置问题	127
6.5.2 三板搭桥问题	128
习题 6	128
 第 7 章 弯曲变形	134
7.1 挠度和转角的概念	134

7.2 挠曲线近似微分方程	135
7.3 计算梁变形的积分法	136
7.4 计算梁变形的叠加法	139
7.4.1 叠加法	139
7.4.2 逐段分析法	141
7.4.3 基于逐段刚化的叠加法	142
7.5 梁的刚度条件和提高弯曲刚度的措施	142
7.5.1 梁的刚度条件	142
7.5.2 提高梁的刚度的措施	144
7.6 简单静不定梁	144
7.7 思考与讨论	147
7.7.1 梁的位移分析的工程意义	147
7.7.2 生活实例探讨	148
习题 7	149
 第 8 章 应力状态分析与强度理论	152
8.1 应力状态的概念	152
8.2 平面应力状态分析	154
8.2.1 斜截面上的应力	154
8.2.2 应力圆的绘制与应用	155
8.3 极值应力与主应力	157
8.3.1 主应力和主方向	157
8.3.2 最大切应力	158
8.3.3 纯剪切状态的最大应力	159
8.4 三向应力状态下的最大应力	159
8.5 广义胡克定律	161
8.6 复杂应力状态下的强度理论	162
8.6.1 最大拉应力理论(第一强度理论)	162
8.6.2 最大拉应变理论(第二强度理论)	163
8.6.3 最大切应力理论(第三强度理论)	163
8.6.4 形状改变比能理论(第四强度理论)	164
8.6.5 单向与纯剪切组合应力状态的强度条件	165
8.7 思考与讨论	168
8.7.1 应力概念的再认识	168
8.7.2 如何建立一点的应力状态并应用	168
习题 8	170

第 9 章 组合变形	175
9.1 组合变形的概念	175
9.2 斜弯曲	176
9.3 拉伸(压缩)与弯曲组合变形	177
9.4 弯曲与扭转组合变形	180
9.5 思考与讨论	185
9.5.1 复杂荷载处理方法	185
9.5.2 归纳组合变形的解题步骤	186
习题 9	187
第 10 章 压杆稳定	190
10.1 压杆稳定的概念	190
10.2 细长压杆的临界压力	191
10.2.1 两端铰支压杆的临界压力	191
10.2.2 其他约束情况压杆的临界压力	192
10.3 压杆的临界应力	194
10.4 压杆的稳定计算	196
10.5 提高压杆承载能力的措施	199
10.5.1 影响压杆承载能力的因素	199
10.5.2 工程中提高压杆承载能力的常见措施	200
习题 10	204
第 11 章 动载荷	208
11.1 构件做等加速直线运动或匀速转动时的动应力计算	208
11.1.1 动应力分析中的动静法	208
11.1.2 等加速运动构件中的动应力分析	208
11.1.3 匀速转动构件内的动应力分析	209
11.2 构件受冲击载荷作用时的动应力计算	210
11.2.1 杆件受冲击时的应力和变形	210
11.2.2 提高构件抗冲能力的措施	214
11.3 交变应力和疲劳破坏的概念	214
11.4 交变应力的特性和疲劳极限	216
11.5 材料的力学性能进一步探讨	217
11.5.1 冲击韧度	218
11.5.2 蠕变与松弛	219
习题 11	220

第 12 章 能量法	224
12.1 外力功、应变能与克拉比隆定理	224
12.1.1 计算外力功的基本公式	224
12.1.2 克拉比隆定理	225
12.1.3 应变能的一般表达式	225
12.2 单位荷载法	227
12.3 静不定问题分析	231
12.4 思考与讨论	235
12.4.1 应变能与加载次序无关	235
12.4.2 互等定理的论证	236
习题 12	237
附录 A 静力学平衡问题	241
A.1 静力学基本概念和公理	241
A.1.1 力	241
A.1.2 力矩	242
A.1.3 力偶	242
A.1.4 静力学公理	243
A.2 物体的受力分析	245
A.2.1 约束与约束反力	245
A.2.2 画受力图	248
A.3 力系的简化	249
A.3.1 平面汇交力系的简化	249
A.3.2 平面力偶系的简化	251
A.3.3 力线平移定理	251
A.3.4 平面任意力系的简化、主矢和主矩	252
A.4 力系的平衡	255
A.4.1 空间力系的平衡	255
A.4.2 平面任意力系的平衡	256
A.4.3 物体系的平衡	258
习题 A	260
附录 B 截面的几何性质	263
B.1 静矩和形心	263
B.1.1 静矩	263
B.1.2 形心	264

B.1.3 组合图形的静矩和形心	264
B.2 惯性矩	265
B.3 惯性矩的平行移轴公式	268
B.4 惯性积与惯性积的平行轴公式	269
B.4.1 截面惯性积	269
B.4.2 惯性积的平行轴公式	270
B.5 转轴公式与主惯性矩	271
B.5.1 转轴公式	271
B.5.2 主轴与主惯性矩	272
习题 B	273
 附录 C 电测法和应变分析	276
C.1 电测法的基本原理	276
C.1.1 应变计的工作原理	276
C.1.2 直流电桥	277
C.1.3 温度补偿	277
C.1.4 全桥接线法	278
C.1.5 半桥接线法	278
C.1.6 串联和并联接线法	278
C.2 应变分析	283
C.2.1 应变状态概念	283
C.2.2 平面应变分析	283
C.3 应变测量与应力计算	286
C.3.1 单轴应力状态	286
C.3.2 主应力方向已知的平面应力状态	286
C.3.3 主应力方向未知的平面应力状态	287
习题 C	292
 附录 D 型钢表	294
 附录 E 主要符号表	297
 参考答案	299
 参考文献	306

第1章

材料力学基本知识

本章介绍材料力学(mechanics of materials)的任务、基本假设、基本概念和基本方法,这些内容对于学习材料力学具有指导意义。

1.1 材料力学的任务

1.1.1 材料力学的研究对象

如图 1.1 ~ 图 1.6 所示,在工程实际中,建筑、桥梁、机械、船舶等结构承受各种外力作用,组成这些结构的零部件统称为构件。如图 1.1 所示屋架中的横梁、檩条;图 1.2 所示斜拉索桥的拉索、桥墩;图 1.3 所示油井打油装置的支座、横梁;图 1.4 所示舰艇上层建筑的杆件;图 1.5 所示桥式起重机的主梁、吊钩、钢丝绳;图 1.6 所示悬臂吊车架的横梁 AB , 支撑杆 CD 都是构件。

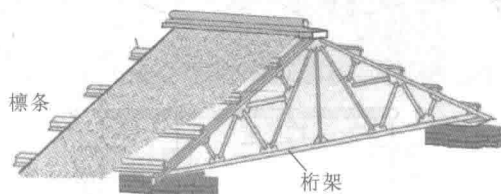


图 1.1 屋架

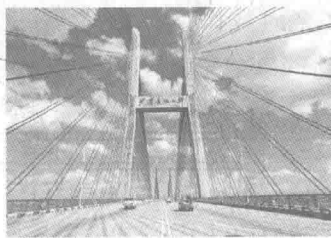


图 1.2 斜拉索桥



图 1.3 油井打油装置



图 1.4 舰艇上层建筑

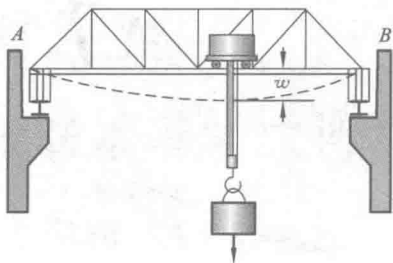


图 1.5 桥式起重机

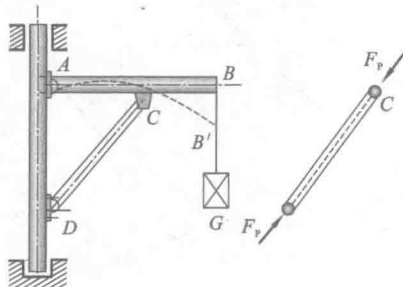
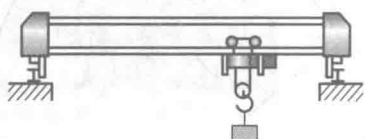


图 1.6 悬臂吊车

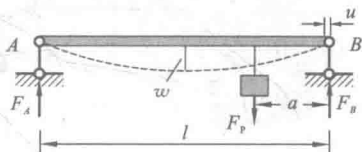
构件所承受的外力称为载荷(force)。在载荷作用下,构件会发生形状或尺寸的改变,称为变形(deformation)。如图 1.6 所示悬臂吊车架的横梁 AB,受力后将由原来的位置弯曲到 AB' 位置,即产生了变形。

构件的变形分为两类:卸除荷载后可恢复的变形称为弹性变形(elastic deformation),卸除荷载后不可恢复的变形称为塑性变形(plastic deformation)。例如:一张弓在拉力作用下,会产生变形,但当去掉力后(不拉它),弓能恢复其原来的形状,弓的变形全部是弹性的。用力踩一个易拉罐,易拉罐会发生变形,但当去掉力后(不踩它),易拉罐不能恢复其原来的形状,易拉罐的变形是塑性的。

绝大多数工程构件的变形都极其微小,比构件本身尺寸要小得多,以至在分析构件所受外力(写出静力平衡方程)时,通常不考虑变形的影响,而仍可以用变形前的尺寸,此即所谓“原始尺寸原理”。材料力学研究的变形通常局限于小变形范围,即小变形前提。如图 1.7(a) 所示桥式起重机主梁,变形后简图如图 1.7(b) 所示,截面最大垂直位移 w 一般仅为跨度 l 的 $1/1500 \sim 1/700$, B 支撑的水平位移 u 则更微小,在求解支座反力 F_A 、 F_B 时,不考虑这些微小变形的影响。



(a) 桥式起重机主梁



(b) 桥式起重机主梁的变形

图 1.7 桥式起重机及变形

工程中实际构件有各种不同的形状,所以根据形状的不同将构件分为:杆件、板、壳和块体。杆件(bars 或 rods)是长度远大于横向尺寸的构件,其几何要素是横截面和轴线,如图 1.8(a) 所示,其中横截面(section)是与轴线垂直的截面;轴线是横截面形心的连线。

按横截面和轴线两个因素可将杆件分为:等截面直杆,如图 1.8(a)、图 1.8(d) 所示;变截面直杆,如图 1.8(c) 所示;曲杆,如图 1.8(b) 所示。在材料力学中,主要研究等截面直杆。

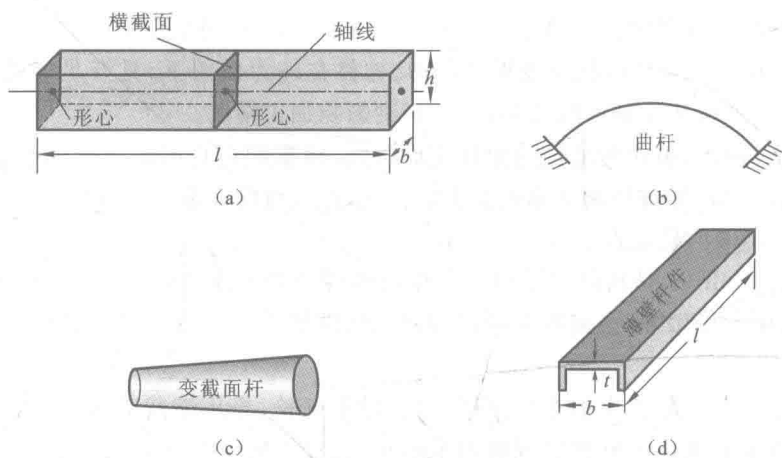


图 1.8 杆件

1.1.2 材料力学的研究内容

工程结构工作时,我们该关心什么问题呢?构件能否正常工作?对不同的变形,构件可能发生失效。如图 1.9 所示的油轮断裂,图 1.10 中的曲轴断裂。

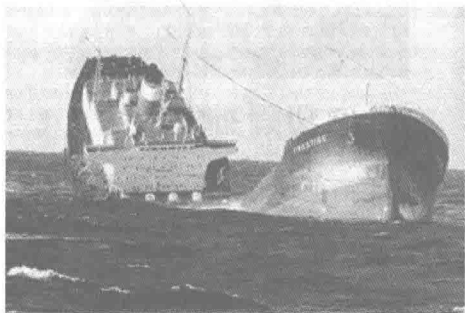


图 1.9 油轮断裂

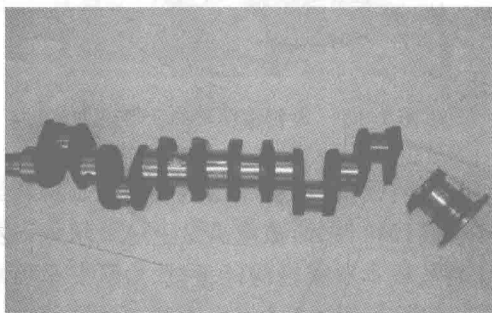


图 1.10 曲轴断裂

构件在较大的外力(载荷)作用下,丧失正常功能的现象称为失效(failure)。为保证构件安全正常地工作,要求构件具有足够的承载能力,不能发生失效。

材料力学是研究构件承载能力的科学,构件的承载能力体现在以下三个方面:

(1) 具备足够的强度。

强度(strength)是构件抵抗破坏的能力。构件在外力作用下,具有足够的强度,不发生断裂或显著塑性变形。例如储气罐不应爆破;机器中的齿轮轴不应断裂等。

如图 1.11 所示,负载过大时,吊钩发生断裂。

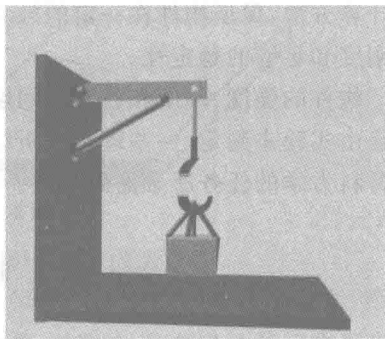


图 1.11 吊钩发生断裂

(2) 具备足够的刚度。

刚度(stiffness)是构件抵抗变形的能力。构件在外力作用下,具有足够的刚度,不产生过大的变形。如机床主轴不应变形过大,否则影响加工精度。

如图 1.12 所示,齿轮传动轴的弹性变形过大,将影响齿轮间的正常啮合,加大磨损,缩短齿轮在役寿命,导致传动机构丧失正常功能,甚至可能造成严重事故。

(3) 具备足够的稳定性。

稳定性(stability)是构件在受到载荷作用时保持原有平衡状态的能力。某些构件在特定外力,如压力作用下,会突然变弯,失去稳定。例如千斤顶的螺杆,内燃机凸轮机构的挺杆等。

如图 1.13 所示,导弹发射车的顶杆,由于过于细长,当压缩载荷超过一定数值时,顶杆便会从直线平衡状态突然转变到弯曲平衡状态,致使顶杆丧失正常功能。

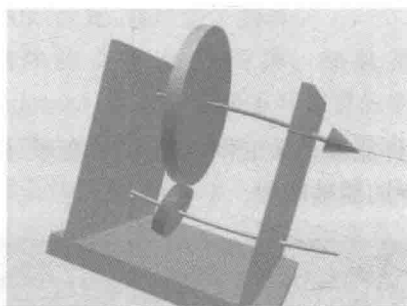


图 1.12 齿轮传动轴的变形过大

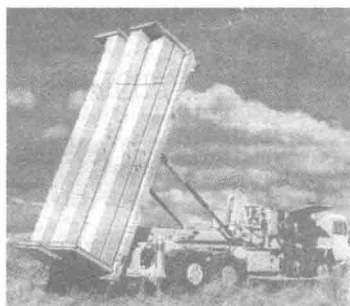


图 1.13 导弹发射车

构件的强度、刚度和稳定性问题是材料力学所要研究的主要内容。

在设计构件时,除应满足上述要求外,还应尽可能地合理选用材料与节省材料,从而降低制造成本并减轻构件重量。为了安全可靠,往往希望选用优质材料与较大截面尺寸,但是,由此又可能造成材料浪费与结构笨重。可见,安全与经济以及安全与重量之间存在矛盾。因此,如何合理地选用材料,如何恰当地确定构件的截面形状与尺寸,便成为构件设计中十分重要的问题。

材料力学的主要任务就是为合理设计构件提供强度、刚度和稳定性分析的理论基础和计算方法,保证构件在一定的的外力作用下正常工作而不失效,构件有足够的强度、足够的刚度和足够的稳定性。

构件的强度、刚度和稳定性问题均与所用材料的力学性能有关,而材料的力学性能主要是由实验来测定,一些理论分析结果也需要实验来检验。因此实验研究和理论分析是完成材料力学的任务所必需的手段。

1.2 材料力学的基本假设

在外力作用下,一切固体都将发生变形,故称为变形固体,而构件一般均由固体材料制成,所以构件一般都是变形固体。变形固体的组成与微观结构非常复杂,为了便于进行